9月 September
2020, 63(9): 1145 – 1152

昆 虫 学 报
ACTA ENTOMOLOGICA SINICA

http://www.insect.org.cn
doi: 10.16380/j.kcxb.2020.09.012

树木病虫害缺陷精准检测方法的综述和展望

周宏威[1,*], 姜钦啸[1], 刘 洋[1], 周宏举[1], 李晓冬[2], 马 玲[3]

(1. 东北林业大学机电工程学院, 哈尔滨 150040; 2. 国家林业和草原局森林和草原病虫害防治总站, 沈阳 110034;
3. 东北林业大学林学院, 哈尔滨 150040)

摘要: 我国疆土辽阔,有着丰富的森林资源。近年来,随着外来昆虫的入侵,全国树木病虫害的暴发率逐年上升,对我国生态经济造成了巨大的影响,但是树木病虫害的监测只能在局部地区,因而只能在已经暴发了较严重的病虫害后才能够发现和治理。树木病虫害如在早期未被发现和处理,可能会造成暴发的严重形势,且预防和治理将变得被动,因此,进行树木内部病虫害缺陷精准检测尤为重要。为更早和更加准确预报树木病虫害的发生,需要进行定期的检测和监控。针对早期传统方法如目测法、敲击辨声法和解剖观测法等方法的准确性低、时效性差和易对树木造成不可逆损害等缺点,近些年研究出了新的检测方法,包括指向性好、能量大的超声波检测法,低成本、穿透性强的应力波检测法,以及成像准确、适用于不同环境的电磁波检测法等。不同的检测方法分别有着相对应的成像算法,如走时法、频域分析法和 Born 近似法等。这些成像算法在分辨率、准确度、精度和计算速度上各有优势。通过对这 3 种检测方法的发展现状进行总结,了解各类检测方法的优缺点,有助于更好地针对不同情况下的树木病虫害做出精准检测,能够把树木病虫害暴发后的被动治理变成暴发前的主动预防,以提早做出应对方案。

关键词: 病虫害; 树木; 内部缺陷; 无损检测; 精准成像; 电磁波; 超声波; 应力波
中图分类号: Q965.8　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 0454-6296(2020)09-1145-08

Review and prospects of accurate detection methods for wood defects caused by diseases and pests

ZHOU Hong-Wei[1,*], JIANG Qin-Xiao[1], LIU Yang[1], ZHOU Hong-Ju[1], LI Xiao-Dong[2], MA Ling[3]
(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China; 2. General Station of Forest and Grassland Pest Management, National Forestry and Grassland Administration, Shenyang 110034, China; 3. School of Forestry, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China)

Abstract: China has a vast territory and abundant forest resources. With the invasion of alien insects, the outbreak rate of tree pests and diseases in China has increased year by year, causing a huge impact on China's ecology and economy. However, monitoring of tree pests and diseases can only be carried out accurately after the outbreak of pests and diseases in some areas. If tree pests and diseases have not been discovered and treated in the early stages, they may cause an explosive and serious situation, and the prevention and control work will be in a passive situation. Therefore, it is particularly important to accurately detect internal defects of wood caused by diseases and pests. For earlier and more accurate predictions of tree pests and diseases, regular testing and monitoring are required. The early traditional methods such as visual inspection, percussion discrimination and anatomical observation have the

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFC12004000); 黑龙江省自然科学基金项目(YQ2020C018); 中央高校基本科研业务费(2572019BF08)
作者简介: 周宏威, 男, 1982 年 2 月生, 吉林集安人, 博士, 高级工程师, 研究方向为林业病虫害检测, E-mail: easyid@163.com
* 通讯作者 Corresponding author, E-mail: easyid@163.com
收稿日期 Received: 2020-02-06; 接受日期 Accepted: 2020-04-03

disadvantages of low accuracy, poor timeliness and irreversible damage to trees. In recent years, modern detection methods have been developed, including the ultrasonic testing methods with good directivity and high energy, the low-cost, highly penetrating stress wave testing methods and the electromagnetic wave testing methods with accurate imaging suitable for different environments. Different detection methods have corresponding imaging algorithms, such as travel time method, frequency domain analysis method and Born approximation method. These imaging algorithms have advantages in resolution, accuracy, precision, and computational speed. By summarizing the development status of these three detection methods, understanding the advantages and disadvantages of various detection methods will help to better detect the pests and diseases of trees under different conditions, turning passive control after the outbreak of tree pests and diseases into active prevention before the outbreak of tree pests and diseases so as to make early response plans.

Key words: Diseases and pests; wood; internal defects; non-destructive testing; accurate imaging; electromagnetic wave; supersonic wave; stress wave

我国人工林面积居世界首位,在林业发展方面有着巨大的成就,但是我国依旧是缺林少林的国家之一。由于林业资源生产力的不足和质量的低下,导致森林的健康程度较低,生态系统的稳定性较差。同时,我国的天然林大部分为次生林,普遍会受到人为的干预,这也就导致了生态不平衡和危险性病虫的入侵,林业生物病虫害的发生率逐年上升。甚至已经上升为直接影响国家贸易和经济发展的战略问题(孙江华等, 2002)。2004 年约有 150 万公顷的林业受灾面积,560 亿元的经济损失是由外来入侵物种松材线虫 *Bursaphelenchus xylophilus*、美国白蛾 *Hyphantria cunea* 等造成的(张星耀等, 2004)。2008 年病虫害的发生面积高达 870 万公顷,产生的经济损失高达 1 100 亿元,被称为"不冒烟的森林火灾"(王金麟等, 2008)。

近年,我国已经成为全球外来林业有害生物发生和危害最为严重的国家之一(赵宇翔等, 2015)。各类病虫害分布遍布全国,且病虫害的暴发面积和发生率逐年上升(迟德富和曹庆杰, 2017)。1982 年松材线虫在我国第一次被发现,地点是在南京中山陵园。因早期缺少有效的检测手段,未能及时预测病虫害的暴发,目前我国已经有 5 亿多棵松树因其病死,共有 500 多万亩因其毁灭,其中的经济损失高达数千亿元(杨忠岐等, 2018)。国家林业局 2019 年第 14 号公告指出,松材线虫病疫情已扩散蔓延至我国 18 省市自治区 580 县市区。对我国的生态系统破坏严重,也使我国的森林资源安全因此受到了巨大的威胁。因此,怎样去保护我国重要的林业资源正逐渐提上了我国的林业经济建设的日程。突发性是大部分树木病虫害暴发的共性,难以在病虫害暴发前做到相应的预警。如果树木病虫害在暴发初期没有被检测到,那么后果会十分严重,此类暴发性的后果往往使得使防治工作十分被动(王彦辉等, 2007)。由此可见,对树木内部的病虫害缺陷进行精准检测,做到提前预报树木病虫害的发生十分重要(刘宏利和刘一江, 2015)。

1 树木病虫害缺陷检测传统方法

早期的树木病虫害缺陷检测中,因缺少相应的设备和技术,研究人员主要采用目测法、敲击辨声法和解剖观测法等传统检测方法。受这些检测方法的限制,对树木病虫害缺陷的检测效果并不理想。

目测法是最古老也是最简单的无损检测方法,这种检测方法至今仍在使用,对于判断和验证树木内部病虫害缺陷的检测结果有很大的帮助。利用这种方法对一些如破裂碎片、机械破坏、后期腐朽和严重的虫蛀等情况进行观察判断,根据检测结果来确定检测对象是否存在缺陷。此类方法只能检测到树木表面的病虫害情况,对树木内部病虫害缺陷无法实现观测,只有当内部病虫害十分严重,表现到树皮外部时,才能够进行有效的判断。

敲击辨声法是通过辨别锤子敲击检测对象时发出声音的音色、音调等声音特性来判断树木是否存在空洞、裂纹、腐朽等缺陷(Ross *et al.*, 1998)。但是这类方法的结果不够准确,树木的种类、含水率甚至天气的好坏都会影响检测人员的判断。因此,敲击辨声法过于依赖检测人员的经验,并不能广泛适用。

解剖观测法是最直接,对树木伤害最大且不可

逆的一种检测方法，通过将检测对象砍断或砍伤，观测横截面或者树皮内部的具体情况来判断病虫害情况。虽然解剖观测法的准确率较高，但是往往会对树木造成严重的不可逆损伤，同时解剖观测法的随机性较大，所选的树木部位具有偶然性。

无论是目测法、敲击辨声法还是解剖观测法这些传统的检测方法，都不同程度地有着准确性低，易对树木造成不可逆损害，时效性差等缺点，并不能对树木病虫害缺陷进行有效的检测，同时，传统检测方法的效率低，受影响因素较多，不适用于大面积树木病虫害的检测，因此这类传统的检测方法必然会被淘汰。

2　树木病虫害缺陷检测现代方法

针对传统方法准确性低，易对树木造成不可逆损害，时效性差等缺点，近些年研究出了新的检测方法，主要有超声波检测法、应力波检测法和电磁波检测法。虽然大部分研究方法多为木材与活立木内部的缺陷检测，但基于木材或活立木内部缺陷检测的研究基础，逐渐有学者开始利用超声波与电磁波对活立木内部的虫蛀孔洞等进行检测研究，因此本文将上述研究内容一并阐述。表 1 为树木内部缺陷检测传统方法与现代方法的优缺点对比。

表 1　树木内部缺陷检测的传统方法与现代方法优缺点对比

Table 1　Comparison of advantages and disadvantages between traditional methods and modern methods for detecting internal defects of wood

方法 Methods		优点 Advantages	缺点 Disadvantages
传统方法 Traditional methods	目测法 Visual method	直接 Direct	只能检测外部病虫害或内部病虫害十分严重已蔓延至外部 Only external diseases and insect pests can be detected or internal diseases and insect pests are very serious and have spread to the outside.
	敲击辨声法 Percussion discrimination	无损 Nondestructive	严重依赖工作人员经验，受环境和树木种类影响较大，准确率低 Heavily dependent on the experience of the staff, greatly affected by the environment and tree species, and has low accuracy.
	解剖观测法 Anatomical observation	准确率高 High accuracy	对树木造成不可逆损伤，时效性差，所选样本有偶然性 Irreversible damage to trees, poor timeliness, and contingency of selected samples.
现代方法 Modern methods	超声波检测法 Ultrasonic testing	微损，指向性好，能量大，穿透力强，受含水率影响小 Micro loss, good directivity, large energy, strong penetration, little influence by moisture content.	需要耦合剂，抗干扰性差，鲁棒性低，不适用于野外 Needing coupling agent, poor anti-interference, low robustness, not suitable for the field.
	应力波检测法 Stress wave testing	微损，设备成本低，无需耦合剂，穿透性较好 Micro loss, low equipment cost, no coupling agent, good penetration.	抗干扰性差，影响因素多，精度不高，操作复杂 Poor anti-interference, many influencing factors, low precision and complex operation.
	电磁波检测法 Electromagnetic wave testing	无损，无需耦合剂，适用各类环境，操作简单 No damage, no need for coupling agent, suitable for all kinds of environments, easy to operate.	穿透性一般，精度受频率影响较大 The penetration is ordinary, and the accuracy is greatly affected by the frequency.

2.1　超声波检测法

超声波检测法的原理主要是依靠超声波在介质传播过程中发生的衰减和散射来确定的。当树木中存在缺陷时超声波的传播就将产生反射、折射和波型转换，通过接收反射回来的超声波，就能够根据波形的变化特征来判断树木内部的缺陷位置、形状及

品质变化(丁希发和王浩全, 2009)。超声波检测原理与设备如图 1 所示。

20 世纪 80 年代,就已经有美国的研究人员对树木进行超声波检测研究,得出通过超声波信号的衰减信号能够判别出内部腐朽的结论,并且频率越低,超声波的检测深度越大(张甜等, 2016)。此外,Mohammed F. Kabir 等木材研究人员通过对不同种类的树木检测时发现,树木种类的不同也会影响检测的正确率(王立海等, 2001)。20 世纪 90 年代国内已经开始使用超声波检测仪对松树内部腐朽的位置与大小进行检测(吕立仁, 1999)。此后,超声检测技术开始广泛应用于树木及木材的检测中。

在超声波检测的算法研究中,刘铁男和王立海(2009)使用一发多收超声波对木材内部的孔洞进行检测,通过比较发射与接收到的超声波的波形图来判断木材内部是否存在孔洞,再通过层析成像法与时域衰减成像法对孔洞进行成像。徐华东等(2010)主要对超声波的层析算法进行研究,超声波发射进入树木中,会产生折射,绕射等情况,通过结合射线追踪法与层析算法,能够得到树木内部的二维缺陷图。

2.2 应力波检测法

应力波检测法的基本原理是通过在树木的一端进行敲击时,树木内部会产生应力波的传播,由于木材内部的缺陷或品质的变化,波的传播时间会有差异,通过测得应力波传播时间的差异,可以对树木内部的病虫害缺陷进行判断。应力波检测原理与设备如图 2 所示。

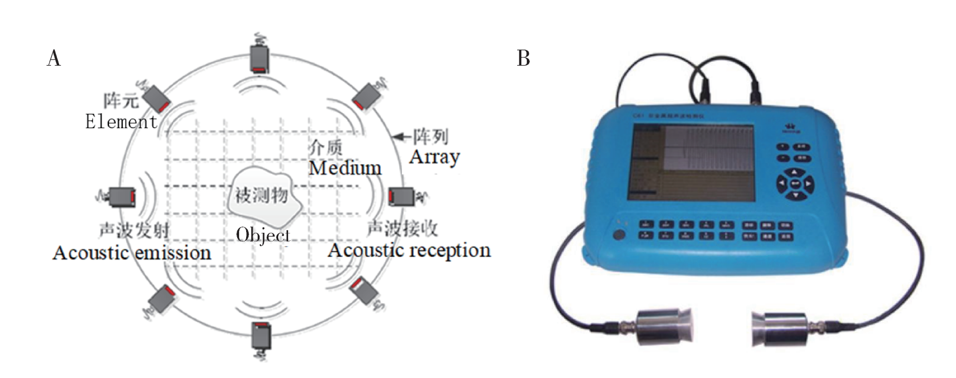


图 1 超声波检测原理图(A)和设备(B)

Fig. 1 Schematic diagram (A) and equipment (B) of ultrasonic testing

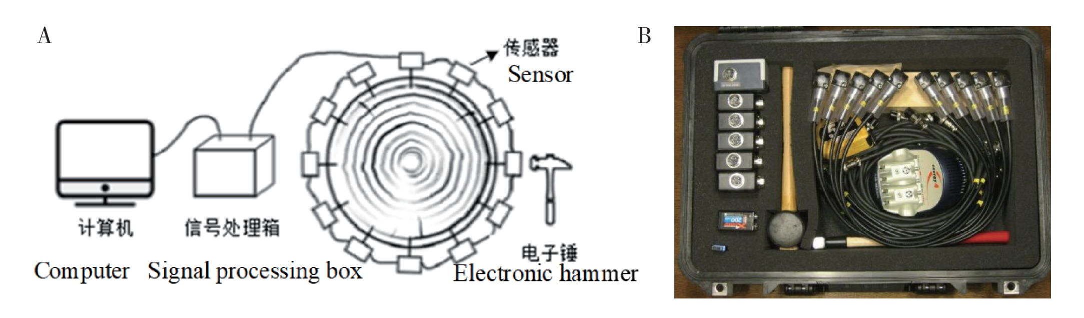


图 2 应力波检测原理图(A)和设备(B)

Fig. 2 Schematic diagram (A) and equipment (B) of stress wave testing

20 世纪 50 年代,国外的科研工作者开始对应力波无损检测技术进行研究;60 年代起,应力波检测进入了树木无损检测的领域。Kristin 等(1996)采用应力波法对木材缺陷进行了检测,结果表明,应力波法可以判断木材内部是否存在腐朽、空洞以及木材节子的情况,但不能判断出缺陷的具体位置。Divos 和 Tanaka(2000)利用应力波技术和声学断层摄影相结合技术开始对树木内部缺陷进行了检测,结果表明,通过选择合理的传感器数量和布置方式可以获取树木内部缺陷的基本截面形状。此后,应力波检测技术也开始广泛被研究人员利用。

如今的应力波成像算法大多基于层析成像法。IABLE 应力波成像算法就是通过采集的树木横截面的应力波速度信号,再迭代反演的方法计算波速在树木断层的网格分布而成像(Huan *et al.*, 2018)。杨学春和罗菊英(2011)通过检测原木不同方向上

的应力波传播速度，应用分离变量方法，在数学原理上分析了应力波在不同方向上的传播过程，研究了应力波传播过程中的反射与透射现象在不同界面上的原理。

2.3　电磁波检测法

电磁波检测法的基本原理是利用高频电磁波以脉冲形式通过发射天线定向地入射树干内部，当电磁波遇到腐朽或空洞等缺陷时会发生相应的散射，散射波由接收天线接收。通过对接收到的信号进行分析处理，可以完成对树木内部病虫害缺陷的检测(朱盂龙和张庆文，2019)。电磁波检测原理与设备如图 3 所示。

早在 20 世纪中期的农业领域中，Myers 和 Allen (1968)就提出基于电磁波的散射特性来获取待测对象的相关信息。更加成熟的电磁波无损检测技术的发展是电磁层析成像(electromagnetic tomography，EMT)技术的产生，其最早由 Yu 等(1998)提出，此后 EMT 技术在无损检测领域得到了广泛应用。Butnor 等(2009)年使用探地雷达术对 3 种针叶树种进行检测，发现电磁波能够准确地检测出针叶类树种中的虫蛀缺陷，其检测结果与破坏性检测法的结果一致。此后，电磁波检测技术也开始广泛应用于树木及木材的内部缺陷或蛀道的无损检测中。

在电磁波成像算法的研究中，后向投影(back projection，BP)算法因其原理简单，具有较高的可移植性，应用最为广泛(Kagalenko and Weedon，1996)。Lv 等(2014)通过研究木材介电常数，根据电磁波在健康区域与缺陷区域之间界面的反射时间和传播速度，求得缺陷的位置，在对采集到的数据进行分析，利用插值法获得了重构的断层图像。Sun 等(2019)利用全聚焦法，对聚合物改性木材中的缺陷进行了层析成像。通过分析不同类型缺陷的成像特性，证明了电磁波在聚合物改性木材内部缺陷检测中的有效性与快速性。

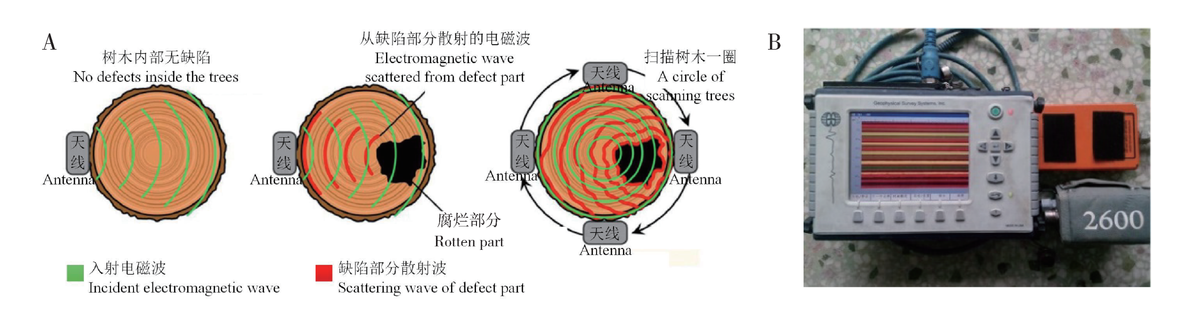


图 3　电磁波检测原理图(A)和设备(B)

Fig. 3　Schematic diagram (A) and equipment (B) of electromagnetic wave testing

3　现代检测方法的实际应用情况

3.1　超声波检测法的应用情况

在超声波检测的应用中，必须使用检测探头紧贴树木进行实验，收集的数据准确度与探头的面积大小息息相关。于文勇等(2006)指出了利用超声波检测时，超声探头(直径 5 cm)与试件端面的大面积接触会直接影响木材缺陷的定位，而且使用小探头或者减少探头与树木表面的接触面积能够提高检测的准确率。同时频率的高低也影响着检测的分辨率，频率越高，检测的分辨率越高，并且超声波的发射功率也要随之加大。超声波检测法多为定性或者半定量，对此，刘铁男和王立海(2009)引入 CT 技术，并提出了使用超声波层析成像技术对树木内部缺陷进行成像，成功完成了相应的检测成像。

超声波检测法的一大特点是无论是在哪种检测领域，都需要使用耦合剂，但是使用耦合剂造成环境污染，也使检测的准备工作变得烦琐，所以耦合剂的使用往往不方便也不安全。另外，超声波检测设备常常体积大价格昂贵，不适于野外大范围的检测。对此，国外已经有研究人员开始基于超声波检测技术，研究操作更简便、设备更轻巧、结果更准确的声波技术检测树干内部病虫害。

声波检测技术主要靠声波层析技术完成检测与成像，Gilbert 等(2016)对巴拿马共和国热带雨林多种树种的活树干进行声波扫描，通过声波层析成像算法对其进行成像，确定了声波检测技术是一种有效且无创的检测方法，可以对树木内部腐朽及蛀道进行检测。Karlinasari 等(2018)使用声波层析技术完成了雅加达公共区域内 15 种共计 300 多棵树的树干内部的检测与评估，实验结果与实际情况一致。

但是常规声波层析技术容易忽略树干的浅层缺陷，Qin 等(2018)提出了使用声激光技术与声波层析成像技术相结合的新型树干缺陷检测方案，实验结果表明，这种技术能够识别树干中存在的浅层缺陷及蛀道。

3.2 应力波检测法的应用情况

应力波检测时所受到的影响因素较多，温度、湿度和树木种类等都会对应力波传播造成不同程度的影响。梁善庆等(2010)根据应力波断层成像理论，采用 Fakopp 2D 应力波断层成像检测仪对杉木树干进行诊断，将 6 个传感器按均匀分布方式钉入树干，收集应力波在木材内部的传播时间，利用传播的距离计算应力波的波速进行成像，可以有效地检测出木材内部的腐朽或缺陷，但是裂纹的检测效果不佳。于文勇等(2006)使用应力波检测仪对香樟内部腐损程度进行了实验研究，实验结果显示，应力波的传播速度受树木的内部腐朽程度影响较大，即随着腐朽程度和应力波传播时间的增加，应力波传播速度会显著下降，实际检测中必须考虑这一影响因素。翁翔等(2016)通过对应力波在完好木与缺陷木中的传播速度进行比较，分析不同季节对应力波传播造成的影响，再将不同种类的树木根据针叶类与阔叶类进行分类，对应力波的传播影响进行分析，为后续的研究提供了基础。就国内外的研究现状来看，应力波对于树木内部较大的缺陷检测结果较好，但是针对裂纹与小缺陷的检测结果并不理想，由于病虫害的蛀道通常半径较小，应力波成像的精确度难以达到。

3.3 电磁波检测法的应用情况

电磁波的传播信号衰减及距离与频率相关，对此丁亮等(2009)采用基于 Maxwell 方程正反演算法来解决高频电磁波的衰减信号较弱的问题。Holmes 等(2013)利用频率范围在 2.3 ~ 6.5 GHz 的电磁波对树木进行介电常数测量，得出运用电磁波对活立木内部心边材部位的检测需要频率在 4 GHz 以上的结论。

用电磁波检测树木内部缺陷或蛀道需要先获得树木的介电常数，树木介电常数的影响因素较多，Lv 等(2014)通过研究木材介电常数，分析介电常数与外界温度、树木含水率、电磁波的发射频率之间的关系，根据电磁波在健康区域与缺陷区域之间界面的反射时间和传播速度，求得缺陷的位置，在对采集到的数据进行分析，获得了重构的断层图像。Zhou 等(2018)提出了一种改进电容法对树木健康组织的介电常数进行测定，加快了检测的速度与准确性。Sun 等(2019)利用全聚焦法，对聚合物改性木材中的缺陷进行了层析成像。通过分析不同类型缺陷的成像特性，证明了电磁波在聚合物改性木材内部缺陷检测中的有效性。

Li 等(2018)利用探地雷达对树木内部腐朽与蛀道进行检测，同时基于点云技术对其进行高分辨率成像。这些检测技术均可应用于观察树干和其他圆柱形物体内部缺陷。也为电磁波对树木内部断层图像的未来三维重建提供了技术支持。Alani 等(2019)进一步使用电磁波检测技术，对橡树树干内部的蛀道进行检测。通过对结合电磁波层析成像方法完成了 3 棵直径不同的橡树的检测实验，试验结果表明，电磁波能够准确地完成对树干内部的腐朽和蛀道的检测与成像。

4 小结与展望

本文针对林业科研人员在病虫害检测中所遇到的问题，分析了树木内部病虫害缺陷检测现状，针对各类检测方法和算法的特点进行了总结。传统的定性目测法、简单的敲击辨声法和造成不可逆损害的解剖观测法正在逐渐被现代检测方法所替代。超声波检测法、应力波检测法以及电磁波检测法成为当下主流的精确检测方法，但是每种检测方法都有不同的优缺点。应力波检测法会对树木造成一定程度的破坏，而且容易受其原理及设备等因素的限制，难以对树木内部病虫害蛀道实现精确检测；超声波检测法会受到耦合剂的限制，也易对树木及周边环境产生污染。超声波检测法凭借声波层析技术的不断改进，检测速度与检测质量不断提高，对树木浅层可完成检测。相对而言，电磁波检测技术及成像算法具有操作快捷简单和成像精度高等特点，可以量化评价树木内部病害和虫洞缺陷的位置、大小和形状，对于树木内部病虫害的精准检测会起到积极的作用。

由于树木结构比较复杂，检测过程中树木的密度、含水率对检测结果影响较大，含水率也随地域、树种类别和年龄的差异而改变，甚至同一树木不同部位含水率也有所变化。因此，若在野外大范围应用则需要测量更多类型的树种，建立一个可动态更新的共享模型参数库，以扩大测量模型的适用性。而且任何一种检测方法都有局限性，这就需要克服单一检测方法的缺点，与其他检测方法有机地结合起来，发挥各类检测方法的优点，从而给出适用于树

木内部病虫害缺陷的检测方法。若想将树木病虫害检测应用到现场实际中，还需检测仪器的集成创新，研制出适合野外现场测量的便携式仪器，减少仪器校正过程的工作量，向着实用化、智能化、便携化、数字化方向发展，实现自动化智能化的高效检测，在实现大面积检测时能够不受环境等条件的约束，以期在树木病虫害的早期诊断和预警中得到更好的应用。

参考文献（References）

Alani AM, Soldovieri F, Catapano I, 2019. The use of ground penetrating radar and microwave tomography for the detection of decay and cavities in tree trunks. *Remote Sens.*, 11(18): 2073.

Butnor JR, Pruyn ML, Shaw DC, Harmon ME, Mucciardi AN, Ryan MG, 2009. Detecting defects in conifers with ground penetrating radar: applications and challenges. *For. Pathol.*, 39(5): 309 – 322.

Chi DF, Cao QJ, 2017. Screening of high virulent entomopathogenic fungal strains to infect larvae of *Cryptorrhynchus lapathi*. *Sci. Silv. Sin.*, 53(1): 119 – 127. ［迟德富，曹庆杰，2017. 感染杨干象幼虫的高致病力虫生真菌菌株筛选. 林业科学，53(1): 119 – 127］

Ding L, Han B, Liu JQ, 2009. Wavelet multiscale method for inversion of Maxwell equation. *Appl. Math. Mech.*, 30(8): 970 – 978. ［丁亮，韩波，刘家琦，2009. Maxwell 方程反演的小波多尺度方法. 应用数学和力学，30(8): 970 – 978］

Ding XF, Wang HQ, 2009. Research and implementation of ultrasonic wave computed tomography detection system. *Electron. Des. Eng.*, 17(11): 74 – 75, 78. ［丁希发，王浩全，2009. 超声层析成像检测系统的研究与实现. 电子设计工程，17(11): 74 – 75, 78］

Divos F, Tanaka T, 2000. Effects of creep on modulus of elasticity determination of wood. *J. Vib. Acoust.*, 122(1): 90 – 92.

Gilbert GS, Ballesteros JO, Barrios-Rodriguez CA, Bonadies EF, Cedeño-Sánchez ML, Fossatti-Caballero NJ, Trejos-Rodríguez MM, Pérez-Suñiga JM, Holub-Young KS, Henn LAW, Thompson JB, García-López CG, Romo AC, Johnston DC, Barrick PP, Jordan FA, Hershcovich S, Russo N, Sánchez JD, Fábrega JP, Lumpkin R, McWilliams HA, Chester KN, Burgos AC, Wong EB, Diab JH, Renteria SA, Harrower JT, Hooton DA, Glenn TC, Faircloth BC, Hubbell SP, 2016. Use of sonic tomography to detect and quantify wood decay in living trees. *Appl. Plant Sci.*, 4(12): 1600060.

Holmes WS, Mukhopadhyay SC, Riley SG, 2013. Dielectric Properties of Wood for Improved Internal Imaging. Springer, Berlin. 93 – 104.

Huan Z, Jiao Z, Li G, Wu X, 2018. Velocity error correction based tomographic imaging for stress wave nondestructive evaluation of wood. *BioResources*, 13(2): 2530 – 2545.

Kagalenko MB, Weedon WH, 1996. Comparison of backpropagation and synthetic aperture imaging algorithms for processing GPR data. In: IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium. 1996 Digest. IEEE, 3. 2179 – 2182.

Karlinasari L, Lestari AT, Nababan MYS, Siregar IZ, Nandika D, 2018. Assessment of urban tree condition using sonic tomography technology. *Earth Environ. Sci.*, 203(1): 012030.

Kristin CS, Sehmoldt DA, Ross RJ, 1996. Nondestructive methods for detecting defects in softwood logs. Research Paper FPL-RP-546. US Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, Madison, WI. 13 pp.

Li WL, Wen J, Xiao ZL, Xu SG, 2018. Application of ground-penetrating radar for detecting internal anomalies in tree trunks with irregular contours. *Sensors*, 18(2): 649.

Liang SQ, Zhao GJ, Fu F, 2010. Diagnosis of internal defects of wood with stress wave tomography. *China Wood Ind.*, 24(5): 11 – 13. ［梁善庆，赵广杰，傅峰，2010. 应力波断层成像诊断木材内部缺陷. 木材工业，24(5): 11 – 13］

Liu HL, Liu YJ, 2015. Garden pest control and urban ecological environment. *Liaoning For. Sci. Technol.*, (4): 64 – 65. ［刘宏利，刘一江，2015. 园林病虫害防治与城市生态环境. 辽宁林业科技，(4): 64 – 65］

Liu TN, Wang LH, 2009. Effects of receiving direction angle on amplitude of ultrasonic attenuation tomography on the cross. *For. Eng.*, 25(3): 60 – 62. ［刘铁男，王立海，2009. 超声波在原木横断面衰减成像中接收方向角对振幅的影响. 森林工程，25(3): 60 – 62］

Lv JX, Gao L, Wen J, 2014. Research on the relationship between moisture content and the dielectric constant of the tree trunk by the radar wave. *Comput. Mod. New Technol.*, 18: 1171 – 1175.

Lv LR, 1999. Technical feasibility study on ultrasonic testing of wood quality. *Appl. Technol. Mark.*, (5): 27. ［吕立仁，1999. 超声波检测木材质量的技术可行性研究. 适用技术市场，(5): 27］

Myers VI, Allen WA, 1968. Electrooptical remote sensing methods as nondestructive testing and measuring techniques in agriculture. *Appl. Opt.*, 7(9): 1819 – 1838.

Qin RY, Qiu QW, Lam JH, Tang AM, Leung MW, Lau D, 2018. Health assessment of tree trunk by using acoustic-laser technique and sonic tomography. *Wood Sci. Technol.*, 52(4): 1113 – 1132.

Ross RJ, Brashaw BK, Pellerin RF, 1998. Nondestructive evaluation of wood. *For. Prod. J.*, 48(1): 14.

Sun JH, Yuan DC, Ouyang H, 2002. Exotic forest pest invasion: a threat to forest ecosystems in China. *For. Pest Dis.*, (6): 32 – 35. ［孙江华，袁德成，欧阳华，2002. 外来入侵种及其对森林生态系统的威胁：概念和对策. 中国森林病虫，(6): 32 – 35］

Sun LP, Zhou HW, Zhou HJ, Jiao GZ, Ma L, 2019. Imaging of internal defects of polymer-modified wood using total focusing method. *Adv. Poly. Technol.*, (10): 1 – 7.

Wang JL, Sun Y, Yang Y, Liu XD, 2008. The establishment of network information management system for garden trees in Northeast China. *For. Sci. Technol.*, (4): 69 – 71. ［王金麟，孙宇，杨扬，刘晓东，2008. 东北地区园林树木网络信息管理系统的建立. 林业科技，(4): 69 – 71］

Wang LH, Yang CX, Xu KH, 2001. Current situations and research development of non-destructive testing for wood properties. *For. Eng.*, (6): 1 – 3. ［王立海，杨学春，徐凯宏，2001. 木材无损检测技术的研究现状与进展. 森林工程，(6): 1 – 3］

Wang YH, Xiao WF, Zhang XY, 2007. Current status and development tendency of forest health monitoring and evaluation. *Sci. Silv. Sin.*, 43(7): 78-85. [王彦辉, 肖文发, 张星耀, 2007. 森林健康监测与评价的国内外现状和发展趋势. 林业科学, 43(7): 78-85]

Weng X, Li GH, Feng HL, Du XC, Chen FX, 2016. Stress wave propagation velocity model in RL plane of standing trees. *Sci. Silv. Sin.*, 52(7): 104-112. [翁翔, 李光辉, 冯海林, 杜晓晨, 陈方翔, 2016. 应力波在树木径切面内的传播速度模型. 林业科学, 52(7): 104-112]

Xu HD, Wang LH, You XF, Liu TN, 2010. Analysis of stress wave propagation in Hankow willow standing trees and stability assessment. *Sci. Silv. Sin.*, 46(8): 145-150. [徐华东, 王立海, 游祥飞, 刘铁男, 2010. 应力波在旱柳立木内的传播规律分析及其安全评价. 林业科学, 46(8): 145-150]

Yang XC, Luo JY, 2011. Different propagation velocity of stress wave in poplar and larch logs. *Sci. Silv. Sin.*, 47(5): 96-100. [杨学春, 罗菊英, 2011. 杨树与落叶松原木中应力波的不同传播速度. 林业科学, 47(5): 96-100]

Yang ZQ, Wang XY, Zhang YN, Zhang YL, 2018. Research advances of Chinese major forest pests by integrated management based on biological control. *Chin. J. Biol. Control*, 34(2): 163-183. [杨忠岐, 王小艺, 张翌楠, 张彦龙, 2018. 以生物防治为主的综合控制我国重大林木病虫害研究进展. 中国生物防治学报, 34(2): 163-183]

Yu WY, Wang LH, Yang HM, Zhang XD, 2006. The study of wood defects detection based on ultrasonic techniques. *For. Eng.*, (6): 7-9. [于文勇, 王立海, 杨慧敏, 张希栋, 2006. 超声波木材缺陷检测若干问题的探讨. 森林工程, (6): 7-9]

Yu ZZ, Peyton AJ, Xu LA, Beck MS, 1998. Ectromagnetic inductance tomography (EMT): sensor, electronics and image reconstruction algorithm for a system with a rotatable parallel excitation field. *IEE Proc. Sci. Meas. Technol.*, 145(1): 20-25.

Zhang T, Chen XW, Lu WD, Liu WQ, 2016. Experimental study on testing internal hole defects of wood by ultrasonic method. *J. Southwest For. Univ.*, 36(1): 121-125, 130. [张甜, 程小武, 陆伟东, 刘伟庆, 2016. 超声波法检测木材内部孔洞缺陷的研究. 西南林业大学学报, 36(1): 121-125, 130]

Zhang XY, Luo YQ, Ye JR, Sun JH, Liang J, 2004. Forest biological disasters in China in the new forestry times. *For. Pest Dis.*, (6): 8-12. [张星耀, 骆有庆, 叶建仁, 孙江华, 梁军, 2004. 国家林业新时期的森林生物灾害研究. 中国森林病虫, (6): 8-12]

Zhao YX, Wu J, Luo YQ, Tao J, 2015. The identification of risk sources of forestry invasive alien species in China and their controlling. *Plant Quar.*, 29(1): 42-47. [赵宇翔, 吴坚, 骆有庆, 陶静, 2015. 中国外来林业有害生物入侵风险源识别与防控对策研究. 植物检疫, 29(1): 42-47]

Zhou HW, Ma L, Sun LP, Zhou HJ, Cai LP, 2018. Impact moderation of power transmission lines on the environment by the shielding of trees. *BioResources*, 13(4): 8239-8250.

Zhu ML, Zhang QW, 2019. Feasibility study on application of domestic geological radar LTD-2100 in tunnel engineering. *China Water Transport*, 19(8): 224-226. [朱孟龙, 张庆文, 2019. 国产地质雷达 LTD-2100 在隧道工程中应用的可行性研究. 中国水运(下半月), 19(8): 224-226]

(责任编辑: 赵利辉)